

Fibrer i anläggningskonstruktioner

I ett doktorandprojekt som genomförts i samarbete mellan Chalmers tekniska högskola och Thomas Concrete Group har experiment utförts för att undersöka hur fibrer påverkar korrosion av konventionell armering. Resultaten visar att kombinationen av fibrer och konventionell armering kan effektivt förlänga livslängden hos anläggningskonstruktioner, dels genom att armeringskorrosion fördröjs och minskas, och dels genom att effekten på bärförmågan av korrosionsskador begränsas. I den här artikeln sammanfattas projektets huvudresultat.

Armerad betong är det vanligaste materialet i anläggningskonstruktioner, såsom broar, tunnlar och hamnar. Dessa konstruktioner utsätts ofta för aggressiva exponeringsförhållanden, till exempel marina miljöer eller vägsalter, som kan orsaka korrosion av armeringen. Detta är ett mycket utbrett problem, som allvarligt påverkar beständigheten hos befintliga armerade betongkonstruktioner. Samtidigt är många anläggningskonstruktioner utformade för att ha en livslängd på upp till 120 år. För att uppnå så långa livslängder har nuvarande konstruktionsregler, Eurokod 2 och EKS – Boverkets konstruktionsregler, strikta krav i form av tjocka täckande betongskikt och små tillåtna sprickvidder. För att uppnå dessa krav krävs ofta stora armeringsmängder och ibland



Figur 1: Exempel på en avsliten armeringsstång ingjuten i fiberarmerad betong.

ytarmering, vilket ofta leder till tätt armerade konstruktioner som orsakar svårigheter i produktionen. Av dessa skäl kan det därför vara intressant att använda fiberarmerad betong i kombination med konventionella armeringsjärn, se *figur 1*.

Omfattande forskning har visat att fibrer i armerade betongkonstruktioner ger en övergripande förbättrad mekanisk prestanda, särskilt med avseende på kontroll av sprickbildning. Idag är användningen av fibrer fortfarande begränsad till tillämpningar såsom industrigolv, plattor på mark, prefabricerade tunnelsegment, sprutbetong och tunna skalstrukturer. Nyligen har dock konstruktionsregler för fiberarmerad betong publicerats (SS 812310) – dessa skulle kunna främja användningen av fibrer i

fler bärande konstruktioner. Men, innan fibrer i stor utsträckning kan användas i armerade betongkonstruktioner utsatta för kloridhaltiga miljöer, behövdes en bättre förståelse för deras inverkan på korrosionsprocessen av konventionella armeringsstänger i betong. För att förstå mer om detta har långtidsförsök genomförts i den här undersökningen. Resultaten kommer att bidra till det pågående standardiseringsarbetet avseende europeiska konstruktionsregler för fiberarmerad betong.

Experiment

Långtidsförsök utfördes på ospruckna och spruckna armerade betongbalkar, utsatta för olika lastförhållanden:

- ospruckna balkar, som aldrig belastades;
- avlastade balkar, som belastades en gång under trepunktsböjning för att framkalla sprickbildning men som sedan var obelastade;
- cykliskt belastade balkar, som belastades fem gånger, för att orsaka en större nedbrytning av gränsskiktet mellan stål



Carlos Gil Berrocal
Chalmers tekniska högskola
och industridoktorand
Thomas Concrete Group



Karin Lundgren
professor,
Chalmers tekniska högskola



Ingemar Löfgren
Thomas Concrete Group och Adj. professor
Chalmers tekniska högskola

och betong, men som sedan var obelastade; och

- belastade balkar, som belastades med en konstant belastning under hela långtidsförsöket.

Korrosion främjades naturligt genom att balkarna utsattes för omväxlande en tio-procentig kloridlösning och torkning i två-veckors-cykler under sammanlagt tre år. Fyra olika provserier gjordes:

- "plain" (utan fibrer);
- "steel" med 35 mm stålfibrer med ändkrokar;
- "hybrid" med en kombination av stålfibrer och 18 mm långa, raka PolyVinyl Alkohol (PVA) fibrer; och
- "synthetic" med 30 mm långa och raka PVA-fibrer.

Balkarnas geometri, armeringsmängd och fibrerna som användes visas i *figur 2*. Ytterligare detaljer om betongblandningar, fiberegenskaper och försöken finns i [1–3].

Korrosionspotentialen hos armeringsjärnen övervakades med hjälp av gjutna referenselektroder för att bestämma när korrosion initierades. Det totala rostangreppet bestämdes vid slutet av experimenten med hjälp av gravimetriska mätningar. Korrosionsmönstren dokumenterades också med hjälp av en 3D-laserskanningsteknik och ur dessa mätningar kunde även lokala rostangrepp vid kritiska tvärsnitt undersökas. Skanningsförfarandet för att bestämma lokala rostangrepp presenteras i *figur 3*, tillsammans med ett exempel på sprickmönstret i en balk och tillhörande korrosionsmönster i armeringsstängerna. Vidare utvärderades effekten av korrosion och fiberarmering på balkarnas bärförmåga och deformationskapacitet genom att trepunkts böjprover utfördes efter långtidsexponeringen.

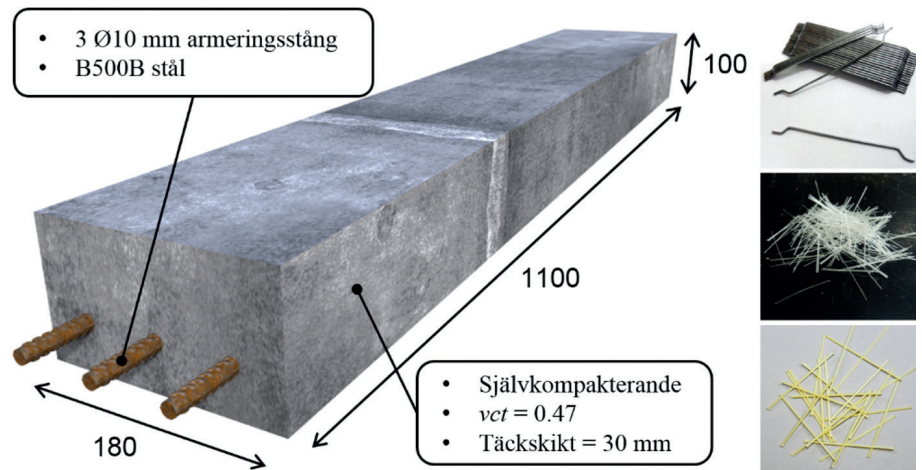
Resultat och diskussion

Tiden till korrosionsinitiering för de olika blandningarna och belastningsförhållandena redovisas i *figur 4*. Notera den logaritmiska skalan på y-axeln. Belastningsförhållandena, och speciellt förekomsten av sprickor, hade den tydligaste inverkan på tiden till korrosionsinitiering. Fibrer hade en generellt positiv effekt som var särskilt märkbar i "hybrid"- och "synthetic"-serierna. Den senare korrosionsinitieringen beror på långsammare kloridinträngning, på grund av att sprickbildningen inuti balkarna blev mer gynnsam i fiberarmerade balkar, med fler mindre sprickor istället för få stora. Notera att dessa positiva resultat gäller för samma sprickvidd på ytan. Vidare

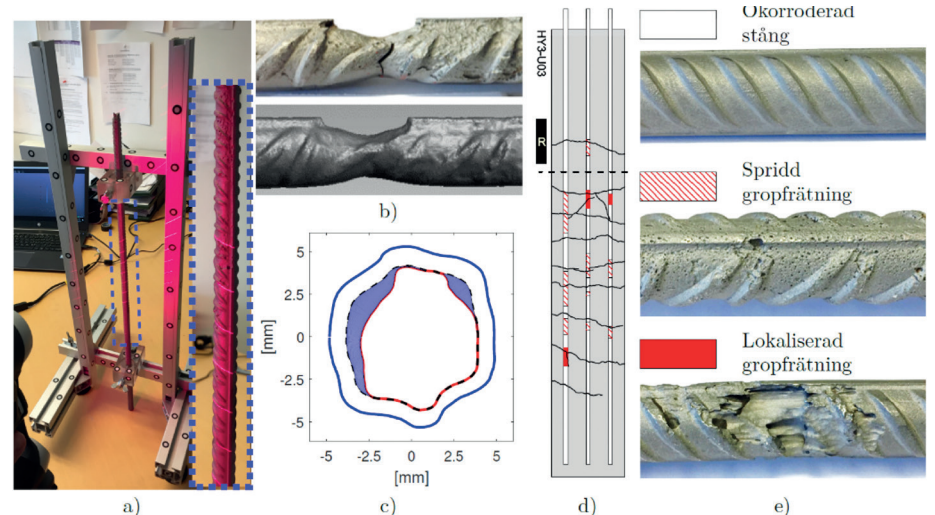
bör det noteras att den belastning som krävdes i fiberarmerade betongbalkar för att uppnå samma ytsprickvidd var mellan 10 procent och 20 procent högre än för balkar utan fibrer.

Figur 5 visar de genomsnittliga korrosionsegenskaperna från undersökningen av armeringsstängerna. Baserat på resultaten som visas i *figur 5a* kan en allmän

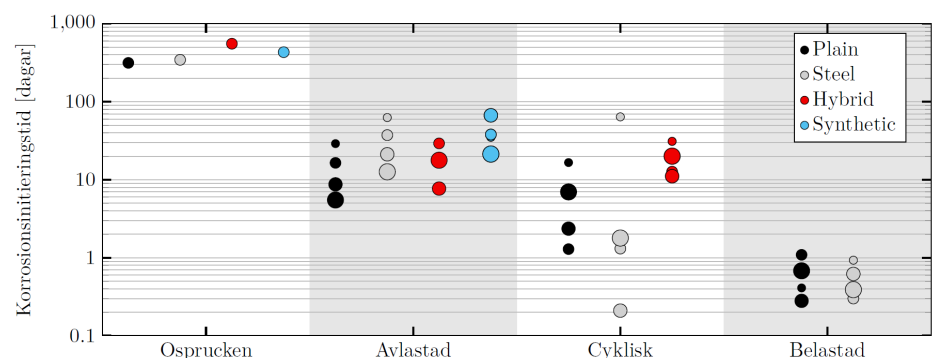
trend observeras där rostangreppet verkar öka för de balkar som belastades för att uppnå en större sprickvidd. Det är ändå viktigt att notera att endast balkar med en konstant belastning under hela långtidsförsöket (♦) hade öppna sprickor under korrosionstesterna, medan för obelastade (■) och cykliskt belastade (○) balkar stängdes sprickorna vid avlastning innan



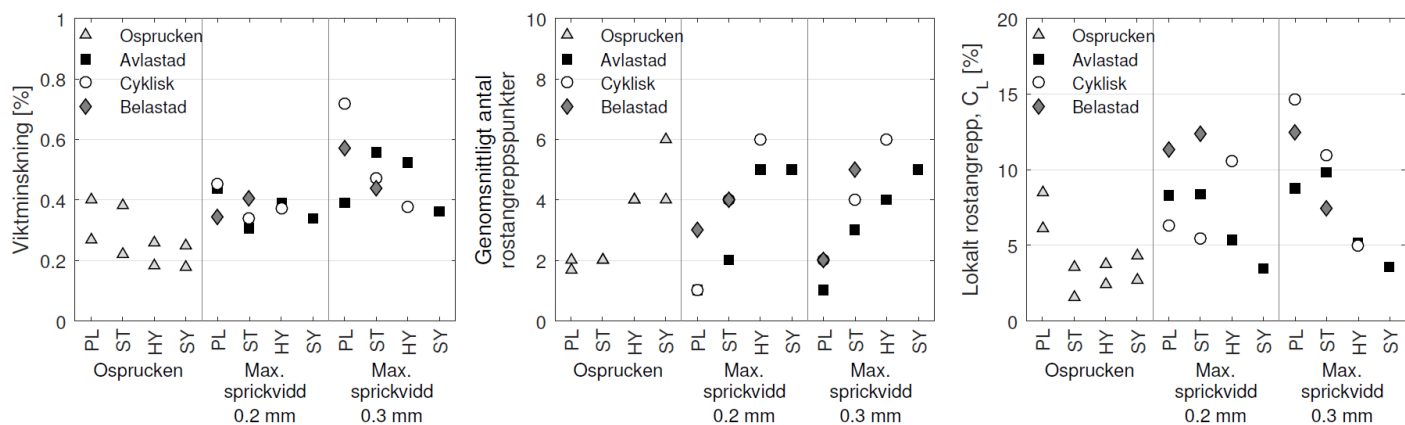
Figur 2: Balkarnas geometri, inklusive armeringsmängd och de olika typerna av fibrer som användes.



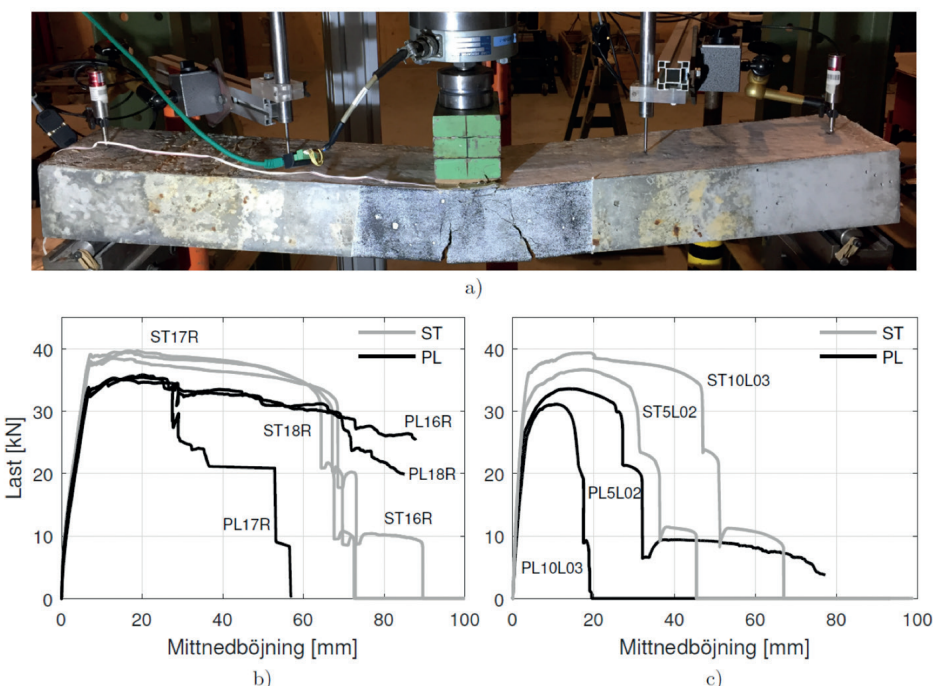
Figur 3: 3D-skanningsförfarande för bestämning av de lokala rostangreppen (a-c) och sprick- och korrosionsmönstren hos en balk (d) som visar de olika typerna av korrosion som observerats (e).



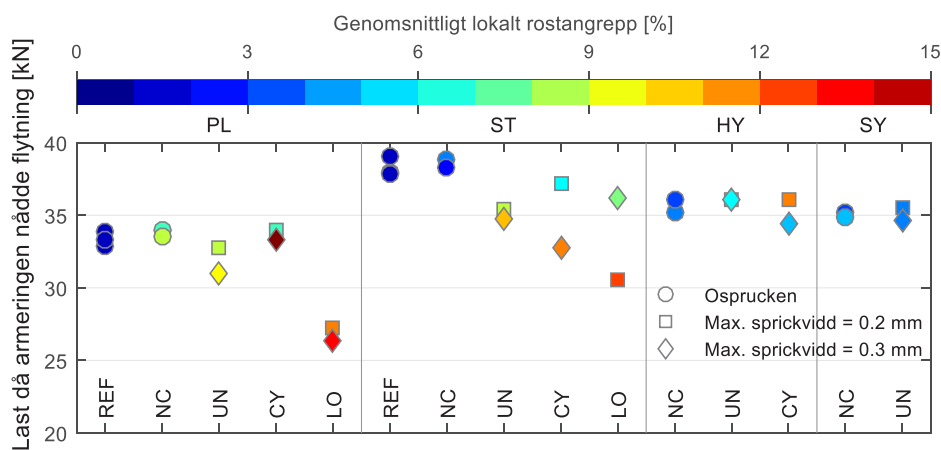
Figur 4: Tid till initiering av korrosion, för varje serie och lastförhållande.



Figur 5: Genomsnittliga korrosionsegenskaper: (a) globalt rostangrepp uttryckt som total viktminskning; (b) antalet rostangreppspunkter hos armeringsstänger; och (c) lokalt rostangrepp, det vill säga minskning av armeringsstångernas tvärsnitt lokalt.



Figur 6: Provpuppställning för trepunkts böjbelastning av balkarna (a) och last-nedböjningsdiagram för okorroderade, ospruckna balkar ("referens") (b) och balkar med korroderad armering, belastade under hela kloridexponeringen (c).



Figur 7: Last då armeringen nådde flytning, för varje serie och lastförhållande. Punkternas färg illustrerar det genomsnittliga lokala rostangreppet för de tre stängerna i varje balk.

långtidsexponeringen i klorider. Denna observation visar att ytsprickvidden inte är den viktigaste parametern som styr armeringskorrosion – istället stöder observationen hypotesen att tillståndet vid gränzytan mellan stål och betong spelar en viktigare roll. Skadan i denna gränzyta blir större ju större belastning och ju fler upprepade belastningscykler konstruktionen utsätts för och vilket orsakar ökad korrosion. Angående effekten av fibrer observerades en liten förbättring i de flesta fall oberoende av serie, även om skillnaderna generellt var små.

Analysen av antalet korrosionsställen, se *figur 5b*, visade att stänger ingjutna i fiberarmerad betong, och speciellt i "hybrid"- och "synthetic"-serierna, konsekvent uppvisade ett ökat antal korrosionsställen jämfört med stängerna i balkarna utan fibrer ("plain") men med minskad gropfrätning. I ospruckna prover hade fibrer en tydligt positiv effekt, se den genomsnittliga tvärsnittsminskningen i *figur 5c*. I spruckna prover var den fördelaktiga effekten uppenbar i "hybrid"- och "synthetic"-serierna, medan stålfibrerna hade en ganska begränsad inverkan i serien "steel". Det ökade antalet korrosionsställen kan i spruckna balkar delvis tillskrivas det högre antalet inre sprickor som bildas i fiberarmerad betong jämfört med betong utan fibrer [4].

Sammantaget visar resultaten att fibrer ger en måttlig minskning av totala korrosionen, men de ger fler men mindre djupa gropfrätningangrepp, vilket är positivt sett till bärförmåga. Det ökade antalet gropfrätningar beror på att förhållandet mellan katod och anod för enskilda korrosionsceller (gropangrepp) minskas. Den provuppställning som användes för trepunkts-böjproverna visas i *figur 6a* tillsammans med last-nedböjningsdiagram för okorroderade, ospruckna

balkar ("referens") i *figur 6b* och korroderade balkar som varit belastade under hela exponeringstiden i klorider, *figur 6c*. Fibrernas effekt på balkarnas böjningsbeteende kan tydligt observeras i *figur 6b*. Först och främst gav fibrerna en ökning av bärförmågan på omkring 15 procent last jämfört med balkarna utan fibrer ("plain"). Vidare gjorde fibrerna att tryckbrottet i betongen i tryckzonen blev stabilare, vilket förhindrade tidigt sprött brott som inträffade för balken PL17R utan fibrer. Å andra sidan slets armeringsstängerna av vid en mindre nedböjning i balkarna med fibrer – detta beror på att vidhäftningen mellan betongen och stängerna förbättrades i fiberarmerad betong. I *figur 6c* kan effekten av armeringskorrosion på böjningsbeteendet tydligt identifieras. Förutom att bärförmågan minskade något beroende på armeringsstängernas reducerade tvärsnitt, så minskade också deformationsförmågan av armeringskorrosion, nästan fyra gånger mer än bärförmågan. Dessutom blev punkten då armeringen flyter otydligare med ökande rostangrepp. En sammanfattning av de laster som orsakade flyt-

ning av armeringen visas i *figur 7* för alla provade balkar. Som ses gav fiberarmerade balkar konsekvent en ökad bärförmåga för samma exponering, lastförhållanden och sprickvidd.

Slutsatser

Den viktigaste slutsatsen som kan dras av resultaten från detta doktorandprojekt är att fiberarmerad betong kan användas i anläggningskonstruktioner utsatta för kloridhaltiga miljöer för att effektivt förlänga deras livslängd. De mekanismer som med hjälp av fibrerna gör detta möjligt är:

- Fördröjd initiering av korrosion på grund av långsammare kloridinträngning, tack vare fibrernas sprickbegränsande förmåga.
- Ett för bär- och deformationsförmågan gynnsammare korrosionsmönster med fler mindre gropfrättingsangrepp istället för få men stora. Detta gör att armeringsstänger i fiberarmerad betong behåller en större tvärsnittsarea lokalt, jämfört med stänger i betong utan fibrer.

- För ett givet rostangrepp mildrar fibrer den negativa effekten av korrosion på konstruktionens bär- och deformationsförmåga, på grund av betongens förbättrade mekaniska egenskaper (bland annat töjningskapacitet) och förbättrad vidhäftning mellan betong och armeringsstål. ■

References

- [1] C.G. Berrocal, I. Löfgren, K. Lundgren, L. Tang, *Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions*, Corros. Sci. 98 (2015) 128–139. doi:10.1016/j.corsci.2015.05.021.
- [2] C. G. Berrocal, *Corrosion of Steel Bars in Fibre Reinforced Concrete: Corrosion mechanisms and structural performance*, PhD thesis - Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017. <https://publications.lib.chalmers.se/publication/251032-corrosion-of-steel-bars-in-fibre-reinforced-concrete-corrosion-mechanisms-and-structural-performance>.
- [3] K. Lundgren, I. Löfgren, C.G. Berrocal, *Kan fibrer påverka beständigheten av konventionellt armerade betongkonstruktioner?*, Bygg & teknik. 7 (2015) 17–19.
- [4] C.G. Berrocal, I. Löfgren, K. Lundgren, N. Göraner, C. Halldén, *Characterisation of bending cracks in R/FRC using image analysis*, Cem. Concr. Res. 90 (2016) 104–116. doi:10.1016/j.cemcon-res.2016.09.016.